

1. はじめに

鉄道車両における快適性には、振動、騒音、車内設備（腰掛けなど）、空気環境（温度、湿度、圧力、においなど）、照明など多くの要因が関係している。このうち振動については、快適性の支配要因として、その低減技術について多くの研究がなされている。近年では、列車の高速化、地盤振動低減、省エネルギー、低コスト化などの要求により車両の軽量化や構造簡素化が進められ、それらによる車体各部の剛性や構造減衰の低下に伴って車体の弾性振動の一種である曲げ振動が乗り心地の面から問題とされる事例が増えている。車体曲げ振動は新幹線など高速で長距離を走行する車両、通勤車両を含む在来線車両など様々な車両でその発生が問題となり、対応が求められている。

ここでは、鉄道車両の車体の曲げ振動の概要、実際の車両の振動特性について述べるとともに、車体曲げ振動低減対策に関する最近の検討例などを示す。なお、本稿では車体の弾性振動として、実際に問題となっている上下方向の曲げ振動に限定して述べる。

2. 鉄道車両の車体構造

車体の主構造部分を構体と呼んでおり、構体は、側・屋根・床構体が一体となって荷重を負担する張殻構造の考え方を取り入れた設計となっている。すなわち車体外板が強度メンバの主体として働き、柱やはりは断面形状を保つような、あるいは車体に負荷される荷重を車体各部に分散させる働きを持つ。図2. 1にステンレス鋼製車体の例を示す。1.5～0.6mmの薄い外板を用い、薄板を曲げて柱やはりを構成し、それらに板を当てて継ぎ手を構成し外板とスポット溶接で接合している。

軽量化や省メンテナンス化のため、近年製造される車両の大半はアルミニウム合金あるいはステンレス鋼の構体である。各材料の特色を生かして、新幹線車両はアルミ合金、在来線はアルミ合金、ステンレス鋼が使用条件などにより使い分けられている。

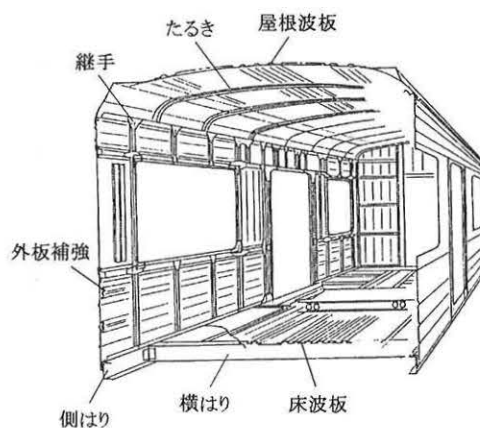


図2. 1 ステンレス鋼製車体の構体例

3. 車体曲げ振動の特徴

3. 1 車体振動の概要

鉄道車両の車体は台車に取り付けられた空気ばねで支持されて走行するが、軌道は完全に平坦ではないため、上下に加振されて振動する。車体上下振動は、車体自身は変形せずに空気ばねの

上で振動する「剛体振動」（固有振動数は 1～2Hz）と、車体が弾性体として振動する「弾性振動」（固有振動数は 5Hz 以上）に分けることができる。後者については図 3. 1 に示すような、車体が両端自由な「はり」の一次の曲げ振動に類似した形状で上下に振動するモードが乗り心地に関して問題となる代表的なものとされ、車体をはりとみなした解析が以前より行われてきた。ただし、軽量化・構造簡素化がすすんだ最近の通勤形車両などは屋根、床、側面が独立して振動する特性を示すことが明らかとなっており、そのような車体の振動解析には立体構造物としての取り扱いが必要となる。車体曲げ振動は、ビリビリと細かい振動として知覚されるので「びびり振動」ともよばれている。

図 3. 2 に、初期の鋼製新幹線車両と軽量化された最近のアルミ合金製新幹線車両の車体床中央における上下振動加速度パワースペクトル密度（PSD）を乗り心地評価に用いる周波数重み（乗り心地フィルタ⁽¹⁾）とともに示す。これらの図において、1～1.5Hz に見られるピークは主に剛体振動（上下並進、ピッチング）によるもので、6.5Hz～8.5Hz に見られるピークが曲げ振動によるものである。走行速度や軌道条件が異なるため両者を同列に扱うことには無理があるが、車体曲げ振動は乗り心地フィルタのゲインが大きい周波数、すなわち人間が上下振動に対して敏感とされる振動数で生じること、軽量車体においては剛体振動に比べ曲げ振動が相対的に増大していること、などがわかる。したがって軽量化・構造簡素化された車両の振動乗り心地を向上させるためには、車体曲げ振動の低減が重要となる。

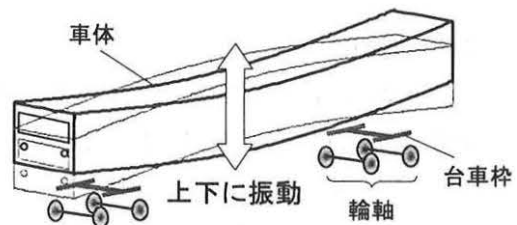


図 3. 1 車体上下曲げ振動

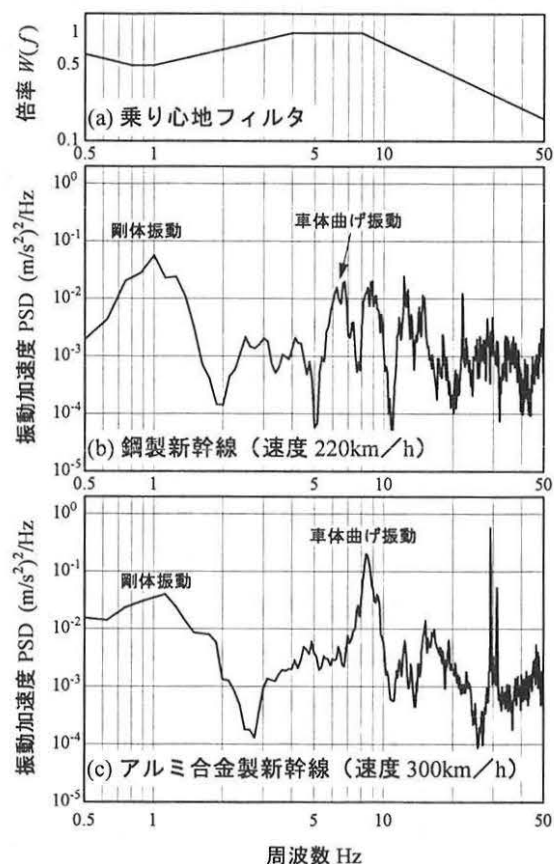


図 3. 2 車体の振動加速度 PSD 測定例
(車体床中央)

3. 2 最近の軽量車両の固有振動モード特性⁽¹⁾

定置加振試験により求めた、最近の軽量車両の固有振動モードの測定結果を図 3. 3（新幹線車両）、3. 4（通勤形車両）にそれぞれ示す。図中の数字は固有振動数を示す。これらの図より、気密構造を持ち、開口部が少ない高速車両は一本のはりとみなせるような振動モード特性を

有するが、開口部が大きく車体各面の結合剛性が低い通勤形車両は、3次元構造物としての複雑な振動特性を持つことがわかる。したがって、対象とする車体の特性に応じた振動低減対策を実施する必要がある。

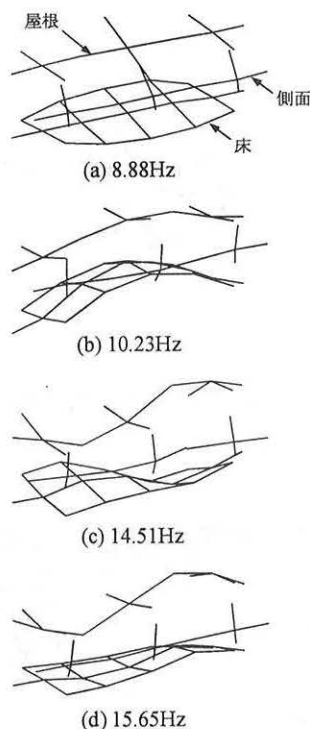


図3.3 新幹線車両の固有振動モード

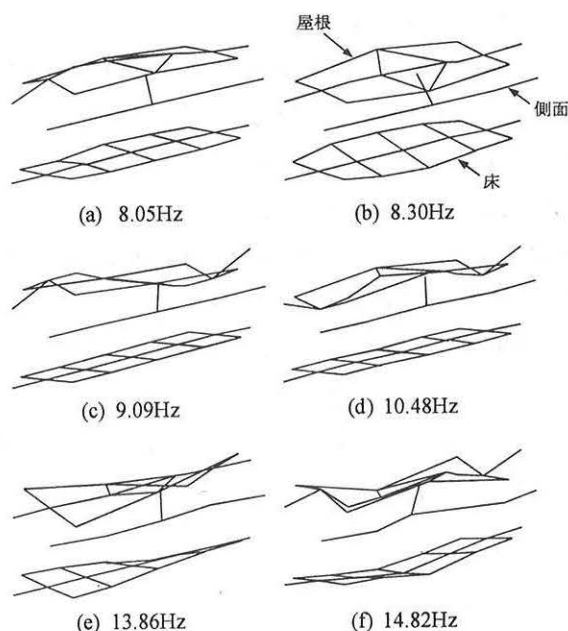


図3.4 通勤形車両の固有振動モード

4. 車体曲げ振動の低減法

4.1 車体曲げ振動の各種低減法

車体曲げ振動低減対策として車体の曲げ剛性の向上がまず考えられるが、車体の構造変更を伴うため、すでに営業に使われている車両に対しては実施しにくい。また重量増大につながることも問題となる。さらに、構造簡素化された最近の車体では曲げ剛性向上が振動低減に直結しない場合もある。車体構造に変更を加えない対策としては、動吸振器を用いる方法⁽²⁾やアクティブコントロールによる制振法^{(3),(4)}が提案されているが、重量増などの点で実用はされていない。

車体の減衰性能を向上させ制振する方法として、粘弾性層と拘束層とからなる制振材を用いる方法⁽⁵⁾がある。これは粘弾性（ゴム）層と拘束（CFRP）層を組み合わせた制振材を屋根外板に貼付するもので、制振材の長さを適切にすることにより、制振効果を最大に発揮することができる。質量約80kgの制振材を貼付することで、乗り心地レベル⁽⁶⁾ L_T で3dB程度の乗り心地改善効果が得られ、新幹線の一部の車両に実用されている。しかし、構造簡素化された車体には適用できないことや、軌道不整による加振状況に対して選択性があることなどにより、それ以降の実用例がない。

これら車体そのものに対策を施す方法とは異なるアプローチなど、最近取り組まれている車体

曲げ振動低減策について以下に紹介する。

(1) 軸ダンパの減衰制御⁽⁷⁾

車体曲げ振動の発生原因は、車輪のアンバランスによる場合を除いて、軌道の不整であり、これにより台車が振動し、車体が振動する。加振源に近い 1 次サスペンションのうち、軸ダンパ (図 4. 2 参照) の減衰力を制御することにより、車体曲げ振動を低減する方法が研究されている。これは軸ダンパをセミアクティブ制御するもので、制振のための新たな動力を必要とせず、また車体構造や空気ばねには一切手を加えていない。制御システムの構成を図 4. 3 に、新幹線電車による走行試験結果を図 4. 4 に示す。制御によって車体の曲げ振動は 1/5 程度に低減され、 L_T 値を 3dB 以上低減できることが確認された。その後中期耐久走行を終え、現在、装置の信頼性向上やコスト低減などの開発が行われており、近い将来の実用化が期待される。

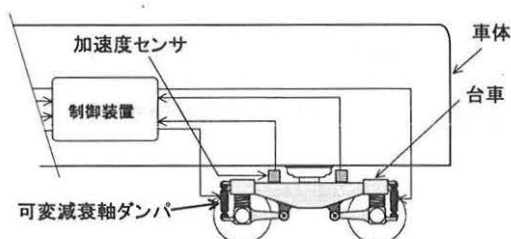


図 4. 3 軸ダンパの減衰制御システム

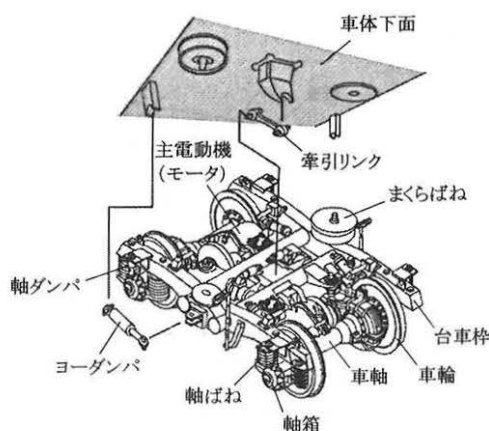


図 4. 2 台車駆動系の主要な構成部品

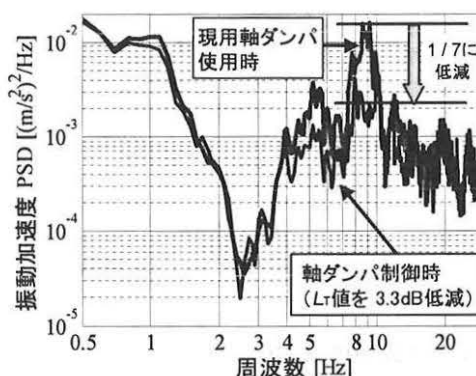


図 4. 4 軸ダンパの減衰制御システム
振動低減効果例 (走行試験結果)

(2) 台車前後振動と車体曲げ振動の連成の利用⁽⁸⁾

図 4. 2 に示すように、車体と台車の間には上下方向に車体を支持する空気ばねのほか、モータの駆動力やブレーキ力を伝える牽引リンクや走行安定性を確保するためのヨーダンパという前後方向の結合要素もある。これらの結合要素により、車体上下曲げ振動と台車前後・ピッチング振動が連成する。本節で述べる車体曲げ振動低減法は、台車前後振動との連成を利用するものであり (図 4. 5)、前後方向の結合要素の剛性 (牽引リンクとヨーダンパの緩衝ゴム剛性) を次式により適切化すれば、台車の前後振動系を車体曲げ振動に対する動吸振器として作用させることができる。

$$K_x = \frac{2k_w M_e \omega_0^2}{2k_w - m_{we} \omega_0^2}$$

ただし、

$K_x = k_b + 2k_y$	台車と車体間の前後系結合剛性[N/m] (1台車あたり)
k_b, k_y	牽引リンクおよびヨーダンパ緩衝ゴム剛性[N/m] (1本あたり)
k_w	軸箱の前後支持剛性[N/m] (1軸箱あたり)
$M_e = m_t + 2m_{we}$	台車の全等価質量[kg] (m_t : 台車枠質量, m_w : 輪軸質量)
$m_{we} = m_w \left[1 + (i_w/R_w)^2 \right]$	輪軸の等価質量[kg] (i_w : 輪軸回転慣性半径, R_w : 車輪半径 [m])
$\omega_0 = 2\pi f_0$	車体曲げ振動の固有角振動数[rad/s] (f_0 : 固有振動数[Hz])

この台車前後振動系による動吸振器作用の効果を新幹線の実車走行試験で確認した例を図4. 6に示す. この図から, 8.5Hz付近の車体曲げ振動のピークが大幅に低減されていることがわかる. このときの床中央における L_T 改善量は2.2dBであった.

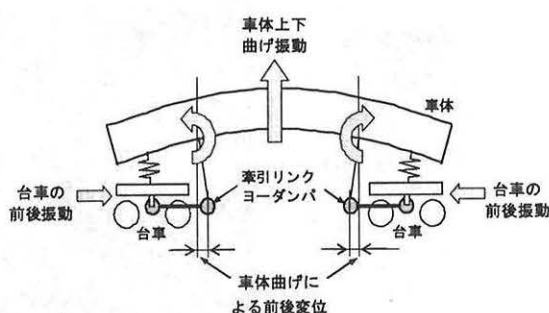


図4. 5 車体上下曲げと台車前後動の連成

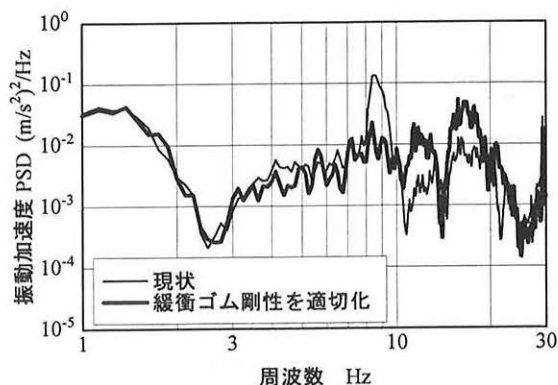


図4. 6 牽引リンクとヨーダンパ緩衝ゴム剛性の適切化による車体曲げ振動低減効果
(新幹線, 速度 300km/h, 床中央)

(3) 車体構造部材配置の工夫, 部材剛性およびそれらの結合剛性向上

屋根たるき, 側柱といったまくら木方向断面内の主要部材剛性を大きくするほか, それらの位置を一致させ, さらに互いの結合剛性を大きくすることで, 屋根, 側, 床が独立な変形モードとなるような振動を抑制できると期待できる. また, 振動モードを車体全体の曲げ振動に近づけ, 他の方法と合わせ対策がしやすくなる. 近年のステンレスの通勤電車では部材位置が一致するように工夫がなされている.

(4) 台車・車体間の結合リンク (牽引リンク) のゴムブッシュ改善⁹⁾

車輪にアンバランスがあると, 車輪回転数に対応した周波数で台車が前後に加振され, その力は牽引リンクを通して車体に加わり曲げモーメントとして作用し車体曲げ振動を励起することになる. この対策として, 牽引リンク本来の機能である駆動・制動力を安定的に伝えることと, 加振力を吸収することを両立させたゴムブッシュ (変位依存緩衝ゴム) が提案されている. ゴムブッシュのゴムと車体・台車への取り付け金具 (ピン) との間に僅かな隙間を設けることで高い周波数の加振力による小さな変位は吸収するが, 駆動・制動力は従来と同様に伝達できる. この変位依存緩衝ゴムによる曲げ振動低減効果を車両試験台で確認した結果を図4. 7に示す. このように車両試験台における加振試験では良好な加振力絶縁効果が得られたため, 実用化を目指した次のステップとして現在営業線での走行試験の準備中である.

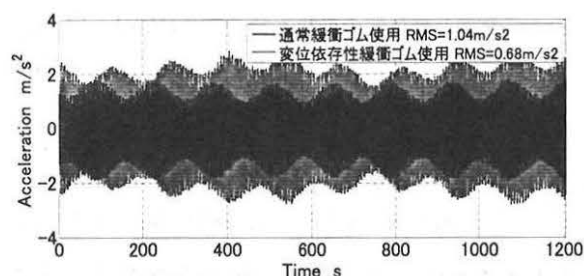


図4. 7 変位依存緩衝ゴムを牽引リンクに適用した場合の車体振動低減効果（車両試験台におけるアンバランス輪軸回転による加振，床中央の上下加速度時間波形）

(5) ダンパつきスタンションポール⁽¹⁰⁾

通勤電車などで屋根と床が逆位相のモードの上下振動が乗り心地を悪くするような場合は，屋根と床との間に配置されているスタンションポール（握り棒）を利用する方法が提案されている．スタンションポールを屋根と床に構造部材として結合し，端部にダンパを仕込むもので，車両試験台での加振試験でその効果が検証されている．ここで使われているダンパは，現状のスタンションポール取付け用金具（天井ダクト内）と標準長が同寸法となるよう設計されており，スタンションポールが装備されている車両については比較的容易に適用可能である．

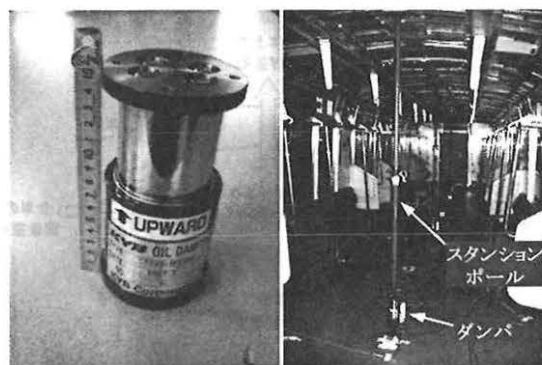


図4. 8 開発したスタンションポール用ダンパと試験車体への設置状況

(6) ピエゾ素子による振動減衰性付与⁽¹¹⁾

ピエゾ素子（圧電素子）は変形すると電圧を生じる性質を持つ．車体にピエゾ素子を貼付し，その電極に抵抗要素を含む「分岐回路」とよばれる電気回路を接続しておく．車体曲げ振動に伴って素子の変形し電圧を発生すると分岐回路に電流が流れ，回路内の抵抗でジュール熱として散逸される．この散逸される熱エネルギーはもともと車体曲げ振動のエネルギーであるため，これにより車体曲げ振動の低減効果が期待できる．新幹線の 1/5 スケールモデルや実車体の定置加振試験で，車体曲げ振動を低減できることを確認した．

4. 2 車体曲げ振動低減対策の考え方

車体曲げ振動の対策をする場合には，曲げ振動の実態を把握し，乗り心地を損ねている振動モードを特定し，それに見合った対策をすることが重要である．問題となる車体振動モードが多数ある場合には部材剛性の変更等によりモードの数を少なくし，対策をしやすくする必要がある．これに関しては，内装財取り付け等の補助的な役割をもつ内部骨組みと呼ばれる部材をうまく活用することで，車体の剛性（および強度）を向上することが可能であり，屋根と床が独立して変形する特性から車体全体が一体で振動する特性に変化させることができることを実車相当の試

験車体で示している⁽¹²⁾。車体全体の曲げモードの対策は、軸ダンパ減衰力制御や台車との連成を利用した方法が現時点では有効と考えられる。

5. おわりに

本稿では、鉄道車両の乗り心地に影響の大きい車体曲げ振動の概要について述べ、その低減に関する最近の検討例を紹介した。他交通機関との競争力向上のため、高速化、快適性に対する要求は高く、この問題の重要性は今後さらに増すものと思われる。新幹線の高速化における対応も必要であるが、新幹線に比べて複雑な振動特性をもつ通勤形車両などの在来線に対する取り組みの強化が望まれている。今後も引続き効果的な振動低減手法の提案、そして車体振動予測手法、車体曲げ振動の少ない車両の設計指針の確立を目指して検討を続けていく必要がある。

参考文献

- (1) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 最近の鉄道車両の固有振動モード特性, 鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2002) 講演論文集, (2002-11), 451-454.
- (2) 石川龍太郎, 佐藤興志, ダイナミックダンパによる車体曲げ振動の低減, 日本機械学会第 68 期通常総会講演会講演論文集 (Vol.C), No.910-17, (1991-3), 531-533.
- (3) 永井正夫, 沢田康宏, 柔軟構造弾性車体のアクティブ支持制御, 日本機械学会論文集, 53-492, C(1987), 750-756
- (4) 梅原隆一, 小野奈津子, 吉田和夫, 車体弾性振動と台車振動の連成を考慮したセミアクティブサスペンションの双線形最適制御, 機論, 69-686, C (2003), 2572-2579
- (5) 鈴木康文, 長南征二, 鉄道車両の車体曲げ振動制振法に関する理論解析, 日本機械学会論文集, 62-598, C(1996), 2132-2139.
- (6) 谷藤克也, 乗り心地管理のための振動解析システムの開発 (第 1 報, 振動解析システムの概要), 日本機械学会論文集, 52-481, C(1986), 2405-2408.
- (7) 菅原能生ほか 3 名, 鉄道車両の 1 次ばね系の減衰制御による上下振動低減 (新幹線電車による高速走行試験結果), 日本機械学会論文集, 74-741, C(2008), 1222-1230.
- (8) 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 台車との相互作用を利用した鉄道車両の車体上下曲げ振動低減法, 日本機械学会論文集, 70-696, C(2004), 2419-2426.
- (9) Tomioka, T., et al., Prevention of Carbody Vibration Induced by Imbalanced Wheelsets with Displacement-Dependent Rubber Bush, Proc. of International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009 (STECH'09), (2009-6), Paper No.358100.
- (10) 富岡隆弘ほか 3 名, 鉄道車両の車体弾性振動低減のためのダンパ内蔵スタンションボールの開発, 日本機械学会機械力学・計測制御 CD-ROM 論文集 (D&D2005), (2005-8), 306.
- (11) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, Joel Hansson, ピエゾ素子を用いた鉄道車両の弾性振動低減 (新幹線車体 1/5 模型による検討), 日本機械学会論文集, 71-704, C(2005), 1254-1262.
- (12) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 相田健一郎, 非構造部材を活用した車体剛性向上手法, 鉄道総研報告, Vol.22, No.9, (2008), 11-16.